



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
STOMATOLOŠKI FAKULTET

Andrea Juran

3D PISAČI U FIKSNOJ PROTETICI

Diplomski rad

Zagreb, 2018.

Rad je ostvaren u: Sveučilište u Zagrebu, Stomatološki fakultet, Zavod za fiksnu protetiku

Mentor rada: doc. dr .sc. Joško Viskiće, Stomatološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu

Lektor hrvatskog jezika: Barbara Kružić, mag. educ. philol. angl. et mag. educ. philol. croat.

Lektor engleskog jezika: Barbara Kružić, mag. educ. philol. angl. et mag. educ. philol. croat.

Sastav Povjerenstva za obranu diplomskog rada:

1. _____
2. _____
3. _____

Datum obrane rada: _____

Rad sadrži: 31 stranica

1 tablicu

7 slika

CD

Osim ako nije drukčije navedeno, sve ilustracije (tablice, slike i dr.) u radu su izvorni doprinos autora diplomskog rada. Autor je odgovoran za pribavljanje dopuštenja za korištenje ilustracija koje nisu njegov izvorni doprinos, kao i za sve moguće posljedice koje mogu nastati zbog nedopuštenog preuzimanja ilustracija odnosno propusta u navođenju njihovog podrijetla.

Zahvala

Zahvaljujem doc. dr. sc. Jošku Viskiću na susretljivosti i stručnim savjetima kojima mi je pomogao da napišem ovaj rad.

Također, zahvaljujem svojim roditeljima, Ankici i Nikoli te sestri Anamariji što su mi bili moralna i financijska podrška kroz cijelo moje školovanje.

Zahvaljujem doktorima Anti i Tomislavu na ukazanom povjerenju i znanju koje su mi prenijeli.

Hvala i mojoj grupi, „Muhama“ te Ivani i Ana Mariji što su bili dio mojih najljepših studentskih dana.

Posebno zahvaljujem svom dečku Josipu koji je uvijek bio kraj mene, dijelio sa mnom sretno trenutke i tješio me kada mi je bilo najteže.

3D pisači u fiksnoj protetici

Sažetak

Trodimenzijsno (3D) ispisivanje aditivna je metoda koja slojevanjem materijala gradi objekte. Informacije o samom objektu šalju se softverom u pisac koji pomoću glave, koja se kreće u x- i y-smjeru, određuje širinu i dužinu objekta, a pomičući platformu prema dolje ili gore niže sloj jedan na drugi u smjeru z osi i gradi visinu predmeta. Postoji više vrsta pisaca koji se razlikuju po načinu rada. Stereolitografija (SLA), digitalna svjetlosna obrada (DLP), selektivno lasersko sinteriranje (SLS), selektivno lasersko taljenje (SLM), koje se smatra podvrstom SLS-a, toplinsko injekcijsko ispisivanje (TIJ), *powder binder* pisači (PBP), fuzijsko depozicijsko modeliranje (FDM) i *polyjet* postupak (PPJ). Svi oni imaju svoje prednosti i mane. Od materijala koriste se polimeri, metali te u novije vrijeme počela se modelirati i keramika. U dentalnoj medicini 3D pisači koriste se u raznim granama, od ortodoncije, restorative, kirurgije i protetike. Indikacije 3D pisaca u protetici jesu izrada individualnih žlica za otiske, situacijskih modela, privremenih nadomjestaka, *mock-up* ljuskica, metalnih osnova za krunice i mostove, konstrukcijskih modela za lijevanje od polimera ili izravno metalne baze proteza, akrilatnih proteza te udloga. Brz razvitak 3D tehnologije ubrzava i olakšava rad kako terapeutu tako i pacijentu. Iako su tek u svojim počecima, 3D pisači u dentalnoj medicini sve se više koriste. Može se očekivati da će u bliskoj budućnosti taj aditivni postupak proizvodnje dosegnuti svoj puni potencijal.

Ključne riječi: 3D pisači; slojevanje; razvitak; fiksna protetika

3D Printers in fixed prosthodontics

Summary

Three-dimensional (3D) printing is an additive method which builds objects by layering the material. The information about the object is sent via software to the printer, which then moves the head of the printer in x and y direction to determine the width and the length of the object and by moving the platform down or up, builds the layer one on top of the other in the direction of the z axis thus producing the height of the object. There are several types of printers which vary according to the way they work. Stereolithography (SLA), Digital Light Processing (DLP), Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting (SLM), which is considered to be variety of SLS, Thermal Inkjet Printing (TIJ), Powder Binder Printer (PBP), Fused Deposition Modeling (FDM) and Photopolymer Jetting (PPJ). They all have certain advantages and disadvantages. Recently, besides polymers and metals, ceramics can be printed as well. 3D printers are increasingly used in dental medicine in various branches, from orthodontics, restorative, surgery and prosthodontics. Indications of 3D printers in prosthodontics are individual impression trays, dental casts, provisorium, mock-up veneers, metal bases for crowns and bridges, construction casting models made of polymer or straight from metal, acrylic prostheses, and splints. The rapid development of 3D technology accelerates and facilitates the work of both the therapist and the patient. Though only starting, 3D printers in dental medicine are increasingly being used. It can be expected that in the near future this additive production process will reach its full potential.

Keywords: 3D printers; layering; development; fixed prosthodontics

SADRŽAJ

| | |
|--|----|
| 1. UVOD..... | 1 |
| 1.1. Stereolitografija | 2 |
| 1.2. Digitalna svjetlosna obrada..... | 2 |
| 1.3. Selektivno lasersko sinteriranje | 3 |
| 1.3.1. Selektivno lasersko taljenje..... | 3 |
| 1.4. Toplinsko injekcijsko printanje | 3 |
| 1.5. <i>Powder binder</i> pisači | 3 |
| 1.6. Fuzijsko depozicijsko modeliranje | 4 |
| 1.7. <i>Polyjet</i> postupak | 4 |
| 2. MATERIJALI..... | 7 |
| 2.1. Polimeri..... | 8 |
| 2.2. Metali..... | 8 |
| 2.3. Keramika..... | 9 |
| 2.4. Završna obrada..... | 10 |
| 3. INDIKACIJE U STOMATOLOŠKOJ PROTETICI..... | 11 |
| 3.1. Individualna žlica za otiske | 11 |
| 3.2. Anatomske modeli..... | 11 |
| 3.3. Privremeni nadomjesci | 13 |
| 3.4. <i>Mock up</i> ljuskice | 14 |
| 3.5. Metalne osnove za krunice/mostove..... | 14 |
| 3.6. Konstrukcijski modeli za lijevanje ili metalne baze proteza | 15 |
| 3.7. Akrilatne proteze | 16 |
| 3.8. Udlage..... | 16 |
| 4. OSTALE INDIKACIJE U DENTALNOJ MEDICINI | 17 |
| 4.1. Udlage u ortodonciji | 17 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.2. | Individualni upornjaci za implantate | 17 |
| 4.3. | Modeli čeljusti | 17 |
| 4.4. | Kirurške šablone | 17 |
| 5. | PRECIZNOST | 20 |
| 6. | RASPRAVA | 22 |
| 7. | ZAKLJUČAK | 24 |
| 8. | LITERATURA | 26 |
| 9. | ŽIVOTOPIS | 30 |

Popis skraćenica

3D – trodimenzionalno (engl. *three-dimensional*)

CAD/CAM – *computer aided design/computer aided manufacturing*

CB/CT – engl. *cone beam computed tomography*

CT – računalna tomografija (engl. *computed tomography*)

DLP – digitalna svjetlosna obrada (engl. *digital light processing*)

FDM – fuzijsko depozicijsko modeliranje (engl. *fused deposition modeling*)

PBP – (engl. *powder binder printer*)

PEEK – polieter eter ketoni

PLA – polilaktična kiselina (engl. *polylactic acid*)

PMMA – polimetil-metakrilat

PPJ – engl. *photopolymer jetting*

SLA – stereolitografija (engl. *stereolithography*)

SLM – selektivno lasersko taljenje (engl. *selective laser melting*)

SLS – selektivno lasersko sinteriranje (engl. *selective laser sintering*)

TIJ – toplinsko injekcijsko printanje (engl. *thermal inkjet printing*)

UV zraka – ultraljubičasta zraka (engl. *ultraviolet*)

1. UVOD

3D ispis proces je stvaranja 3D objekta iz digitalnog, virtualnog oblika tako da glava pisača ide u x- i y-smjeru, određujući tako dužinu i širinu predmeta, a nižući slojeve jedan na drugi stvara z os, odnosno visinu konačnog predmeta. Koncept 3D ispisa prvi je osmislio Amerikanac Charles Hull nazvavši ga „stereolitografija“. Također, zaslužan je i za sam STL format u kojem se objekt dizajnira i naposljetku prenosi u 3D pisac. 1983. godine njegova tvrtka *3D Systems* napravila je prvi 3D pisac pod nazivom *Stereolithography apparatus*, što je dovelo do revolucije u proizvodnji. 3D pisaci se prvi puta pojavljuju na tržištu 1988. godine. Uporaba 3D pisaca u medicini započela je 2000-ih godina. Danas se koristi za bioprintanje tkiva i organa, izradu individualnih implantata i proteza u ortopediji, izradu anatomskih modela za planiranje i simuliranje operacija te u farmaceutске svrhe, gdje se koristi za kontrolu metabolizma lijeka na isprintanom organu ili za printanje nestandardnih doza lijekova koje su prilagođene djeci i starijoj populaciji. 3D ispis koristi se, kako u ostalim granama medicine tako i u dentalnoj medicini. S obzirom na način rada postoji više vrsta tehnologije za 3D ispis.

Svrha ovog rada koji opisuje relativno novu tehnologiju 3D pisanja u dentalnoj medicini je sažimanje svih dosadašnjih znanja o toj aditivnoj metodi proizvodnje.

1.1 Stereolitografija

Tehnologija 3D ispisa na principu stereolitografije temelji se na pisacima koji se sastoje od kadice u kojoj se nalazi tekući materijal, odnosno smola, platforme koja se lagano spušta i time omogućava da sloj tekućeg materijala pokrije podlogu i od ultraljubičaste (UV) zrake koja se putem skenera usmjerava na platformu i slojevito polimerizira smolu.

1.2 Digitalna svjetlosna obrada

Ta vrsta 3D tehnologije ispisa vrlo je slična stereolitografiji, ali se za razliku od stereolitografije koriste ogledala koja usmjeravaju svjetlo iz projektora i umjesto jedne točke, polimerizira se cijeli sloj tekuće smole i samim time postiže se velika brzina ispisa (1). Objekt kod te metode izrađen je postupnim odizanjem platforme. Od materijala koriste se samo polimeri osjetljivi na svjetlo i vosku slični materijali.

1.3 Selektivno lasersko sinteriranje

Objekt kod tog tipa 3D tehnologije ispisa dobiva se procesom slojevitog sinteriranja, odnosno kada valjak donese sloj materijala u prahu na platformu, laserska se zraka putem skenera usmjerava na materijal i zagrijava prah do temperature taljenja, spajajući tako čestice praha u veće nakupine, tzv. aglomerate. Nakon sinteriranog prvog sloja, operacije se slijedno ponavljaju sve do pune veličine željenog objekta. Materijali koji se koriste fleksibilni su elastomeri, najloni s metalnim dodatcima i bez metalnih dodataka, kompoziti, polietar-eterketoni (PEEK), metali i metalne legure (titan, kobalt-krom, nehrđajući čelik).

1.3.1 Selektivno lasersko taljenje

Selektivno lasersko taljenje ili direktno lasersko sinteriranje metala tehnologija je 3D ispisa koja se smatra podvrstom SLS-a (2). Riječ je o aditivnoj tehnologiji proizvodnje koja se koristi za printanje metalnih dijelova. Najčešće se koriste titanij i kobalt-krom legure, iako se teoretski mogu koristiti i drugi metali kao što su aluminij, legure nikla te nehrđajući čelik. Kvaliteta ispisa općenito je izvrsna (3).

1.4 Toplinsko injekcijsko printanje

Toplinsko injekcijsko printanje beskontaktna je tehnika tehnologije 3D ispisa kod koje glava pisača ne dotiče podlogu. Pisač se sastoji od grijača koji koristi toplinsku, elektromagnetsku ili piezoelektroničku energiju za zagrijavanje materijala stvarajući pritom mjehurić zraka koji pritišće ostatak materijala prema otvoru, i kada mjehurić pukne, stvara se impuls, kapljica se izbacuje van te se u doticaju s podlogom stvrdnjava. Kapljice su veličine 10 – 150 pikolitara (4). Tehnika izravnog injekcijskog ispisa (engl. *Direct Inkjet Printing*) podvrsta je injekcijskog ispisa koja se koristi za modeliranje keramike.

1.5 Powder binder pisači

Powder binder tehnologija 3D printanja zasniva se na pisačima koji se sastoje od glave koja izbacuje kapljice tekućine koja povezuje i stvrdnjava prah rasut na platformi. Kada je završen prvi sloj, valjak nanosi novi sloj praha i proces se ponavlja. Na kraju se pore, koje su

ostale između čestica praha, popunjavaju cijanoakrilatom ili epoksi smolom i samim time povećava se čvrstoća.

1.6 Fuzijsko depozicijsko modeliranje

Fuzijsko depozicijsko modeliranje tehnologija je 3D ispisa koja se zasniva na sličnom principu kao i toplinska injekcijska tehnologija izrade. Međutim, početni materijal nije u tekućem već u krutom stanju, zagrijavanjem se rastapa, a hlađenjem poprima konačan oblik. Glava pisača izbacuje kapljice materijala gradeći početni sloj i veže svaki sljedeći sloj za prethodni. Koriste se termoplastični materijali i to uglavnom biološki razgradiv polimer polilaktične kiseline (engl. *polylactic acid* – PLA).

1.7. Polyjet postupak

Način rada *Photopolymer Jetting* pisača također je sličan načinu rada TIJ pisača, ali za razliku od njega, nakon nanesenog materijala, sloj se mora osvijetliti UV svjetlom kako bi se fotopolimerizirao. S obzirom na to da ti pisači mogu imati više glava, može se simultano nanositi više različitih materijala. Od materijala koriste se smole, voskovi te silikoni.

Sve navedene tehnologije 3D ispisa imaju svoje brojne prednosti i nedostatke, najvažnije od njih navedene su u tablici 1 (1).

Tablica 1. Prednosti i nedostaci pisača

| VRSTE PISAČA | PREDNOSTI | MANE |
|--|---|--|
| Stereolitografija (engl. <i>Stereolithography</i> , SLA) | <ul style="list-style-type: none"> - brza proizvodnja - proizvodnja kompleksnih objekata visoke rezolucije - niska cijena materijala | <ul style="list-style-type: none"> - skupa oprema - ograničenost materijala za uporabu - smola može izazvati preosjetljivost dišnih puteva - ograničeni rok trajanja materijala - materijal ne podnosi visoke temperature |

Tablica 1. Prednosti i nedostaci pisača (nastavak)

| | | |
|---|--|--|
| Digitalna svjetlosna obrada (engl. <i>Digital light processing</i> , DLP) | <ul style="list-style-type: none"> - dobra preciznost - glatke površine dobivenog objekta - relativno brza izrada | <ul style="list-style-type: none"> - iste kao kod stereolitografije |
| Selektivno lasersko sinteriranje (engl. <i>Selective laser sintering</i> , SLS) | <ul style="list-style-type: none"> - veliki raspon materijala - visoka čvrstoća - mogućnost postizanja finih detalja - mogućnost sterilizacije nekih materijala u autoklavu - neiskorišteni metalni prah se može ponovno upotrijebiti | <ul style="list-style-type: none"> - skupa oprema - materijali umjereno skupi - neuredan za uporabu - rizik od inhalacije - potrebna toplinska završna obrada - relativno spor proces izrade |
| Selektivno lasersko taljenje (engl. <i>Selective laser melting</i> , SLM) | <ul style="list-style-type: none"> - visoka čvrstoća - kontrola poroznosti - mogućnost korištenja različitih metala - mogućnost recikliranja metala - visoka preciznost | <ul style="list-style-type: none"> - zahtjeva puno prostora - skupa tehnologija - rizik od eksplozije, inhalacije prašine i nanočestica - gruba površina koju treba obraditi - teško ukloniti potporne materijale - relativno spor process |
| Toplinsko injekcijsko printanje (engl. <i>Thermal inkjet printing</i> , TIP) | <ul style="list-style-type: none"> - visoka preciznost - bioprintanje | <ul style="list-style-type: none"> - skupa oprema i materijali |

Tablica 1. Prednosti i nedostaci pisača (nastavak)

| | | |
|---|---|---|
| <i>Powder Binder Printers</i> (PBP) | <ul style="list-style-type: none"> - jeftiniji materijali i tehnologija - mogućnost izrade modela u boji - relativno brz proces izrade | <ul style="list-style-type: none"> - niska rezolucija - niska čvrstoća - neuredan materijal - nemogućnost steriliziranja topline |
| Fuzijsko depozicijsko sinteriranje (engl. <i>Fusion deposition modeling</i> , FDM) | <ul style="list-style-type: none"> - visoka preciznost - niski do srednje visoki troškovi materijala i opreme - neke materijale moguće toplinski sterilizirati | <ul style="list-style-type: none"> - samo termoplastični materijali - ograničene kompleksnosti oblika za biološke materijale |
| <i>Polyjet</i> postupak (engl. <i>Photopolymer jetting</i> , PPJ) | <ul style="list-style-type: none"> - relativno brz proces izrade - visoka rezolucija - raznolikost materijala - dostupno u više boja - mogućnost visokokvalitetne završne obrade - niži trošak za tehnologiju | <ul style="list-style-type: none"> - visoke cijene materijala - kod nepotpune polimerizacije materijal može uzrokovati iritaciju kože - nemogućnost steriliziranja topline |

2. MATERIJALI

Jedna od glavnih prednosti tehnologije 3D ispisa jest ušteda materijala. Kao aditivni postupak preostali materijal može se ponovno koristiti za razliku od suptraktivnih metoda proizvodnje, gdje se višak materijala od bloka ne može iskoristiti, stoga se baca. Materijali koji se koriste za 3D ispis jesu polimeri, metali i keramika (4).

2.1 Polimeri

Polimeri jesu prvi i ujedno najraširenije korišteni materijali za 3D ispis u dentalnoj medicini. Zajednička je komponentna polimera koji se trenutno koriste u 3D ispisu mogućnost polimeriziranja svjetlošću određene valne duljine. Različiti aditivni postupci omogućuju obradu polimera kao što su: SLA, DLP, SLS, FDM, PPJ. Od polimera koriste se smole, vosak, silikoni, kompoziti i PEEK. Neki od zahtjeva koje moraju zadovoljiti jesu preciznost i otpornost na abraziju. Iako su istraživanja na smolama za 3D ispis klinički prihvatljiva, smole i dalje imaju ograničenja u mogućnosti korištenja za trajne restauracije zbog njihova skupljanja tijekom polimerizacije i ograničene čvrstoće (4). U tijeku su istraživanja koja bi poboljšala svojstva smola, na primjer proizvodnja smole koja bi imala antimikrobna svojstva (5).

2.2 Metali

U počecima aditivne proizvodnje metalnih nadomjestaka koristili su se SLS pisači. Metali koji su se primjenjivali su titanija, kobalt-krom i legure nikla. Polimer je bio vezno sredstvo za metalni prah tijekom sinteriranja, stoga na tim mjestima površne objekta bile su porozne. Također, promjer i snaga lasera bile su nepravilno konfigurirane, pa se nije mogao dobiti čvrsti objekt, bez pora. S vremenom je uklonjeno vezno sredstvo i povećala se čvrstoća dobivenih metalnih nadomjestaka, a nikal se zbog velikog postotka alergijskih reakcija prestao koristiti za aditivnu proizvodnju (4). Iako se danas gotovo svi metali mogu koristiti u postupku 3D ispisa, najčešće se primjenjuju aluminij, kobalt-krom te titanij. Od 3D pisača u dentalnoj medicini metali se obrađuju postupkom laserskog taljenja koji naspram konvencionalne metode lijevanja metala ima manje naprezanje materijala unutar objekta, a naspram metode glodanja metala, kod laserskog taljenja nema troška na svrdlima koja se brzo troše. Nedostatak te metode spora je proizvodnja te još uvijek skupa oprema koja zahtjeva veliki prostor, pa se takvi pisači koriste u laboratorijima za centralnu proizvodnju (6).

2.3 Keramika

Aditivna tehnika brzo napreduje pa je danas moguće printati objekte od keramike. 3D pisači koji omogućuju obradu keramike jesu SLS, SLA i PBP (4). U preglednom članku Silva i suradnici raspravljaju o upotrebi procesa *robocasting* kako bi se izradile mosne konstrukcije (7). *Robocasting* je računalno potpomognuta metoda 3D ispisa koja za proces slojevanja koristi pastu sastavljenu od keramičkih čestica i tipično 47 % čvrste supstance i 1 – 2 % organskog materijala koji pomoću mlaznice izbacuje na ravnu podlogu. *Robocasting* omogućuje izradu finih detalja izrađenih iz keramike uz minimalnu volumnu kontrakciju. Međutim, smatra se da je područje koje je potrebno usavršiti kako bi se ostvario puni potencijali te aditivne metode poboljšanje potpornih materijala koji sprječavaju da se okluzalna ploha nadomjestka spljošti prilikom njenog slojevitog printanja kao i minimaliziranje procesa *stair-stepping-a*, tj., nastanka stepenica na površini konačnog nadomjestka. *Stair-stepping* ovisi o promjeru mlaznice koja se koristi za printanje i ta pojava na površini nadomjestka zahtjeva njegovu kasniju obradu. Vrijeme koje je potrebno za ispis željenog nadomjestka iznosi 10 – 30 minuta, ovisno o njegovoj veličini (7). Tehnika izravnog injekcijskog ispisa (engl. *Direct Inkjet Printing*) druga je metoda koja koristi cirkonij keramičku suspenziju (27 % čvrste supstance) (8). Ti pisači imaju posebnu glavu kroz koju izbacuju keramičku suspenziju, tzv. *drop-on-demand* glavu. Izbacivanje suspenzije iz glave pisača ovisi o njezinom punjenju materijalom, pH vrijednosti i brzini sušenja suspenzije nakon izbacivanja iz glave pisača. Sve to omogućuje nam da se materijal izbacuje pod niskim tlakom i zbog toga zadržava zadani oblik. Na dimenzijsku preciznost također utječu i veličina mlaznice, brzina izbacivanja materijala te udaljenost mlaznice od podloge, odnosno od prethodnog sloja (9-12). Smatra se da su glavni nedostaci i budući izazovi u modeliranju keramike njezina poroznost, volumna kontrakcija prilikom kasnije obrade te pojava stepenica na površini (4, 13).

2.4 Završna obrada

Svim 3D pisačima je zajedničko da se dobiveni nadomjestci moraju završno obraditi. To ovisno o tehnologiji izrade može podrazumijevati čišćenje u ultrazvučnoj kupki i/ili dodatno izlaganje svjetlu u polimerizacijskom uređaju. U završnu obradu ubraja se i uklanjanje potpornih struktura te zaglađivanje spojnih mjesta. Ako je potrebno izvršiti poliranje i bojanje, nužno je to napraviti prema uputama proizvođača kako bi se izbjegla potencijalna oštećenja, odnosno slabljenje dobivenog nadomjestka (6).

3. INDIKACIJE U STOMATOLOŠKOJ PROTETICI

3.1 Individualna žlica za otiske

Za izradu individualnih žlica potrebno je najprije digitalnim skenerom skenirati čeljust izravno u ustima pacijenta skenirati anatomske otiske ili već izliveni anatomske modele. Nakon toga slijedi obrada skeniranog objekta u softveru da se dobije 3D model. Zatim se na dobivenom modelu prikazuju podminirana mjesta koja je potrebno popuniti. Softver može sam izraditi konstrukcijski prijedlog koji se ručno kasnije prilagođava. Tako moguće je premještati točke koje određuju rubne granice žlice i odabrati njezinu debljinu. Postavljaju se držači mjesta i ako je potrebno dodati držač žlice. Kod implantatnih žlica za otiskivanje moguće je postaviti vodilice za pravilno vođenje otisnih bataljaka. Žlicu, ovisno o tehnologiji ispisa, moguće je isprintati za 15 – 30 minuta. Izrađena žlica zahtjeva minimalnu ili nikakvu završnu obradu (14).

3.2 Anatomske modele

Prvi korak u izradi modela je skeniranje ili otiska ili situacije u ustima. Zatim slijedi obrada u softveru te printanje modela. Danas nije isključivo da se model mora isprintati, već se željeni nadomjestak može digitalno obraditi na virtualnom modelu (15). Također, moguće je po potrebi, udvostručiti anatomske modele, skenirati postojeći i tako izravno unositi STL podatke u softver (16). Prednost je takvih softvera što je moguće i skladištiti modele pa ga možemo ponovno isprintati kad god nam je to potrebno. Printati se mogu sve vrste modela, modeli bezube čeljusti ili bataljka, potpuni ili djelomični modeli i drugi (slike 1 i 2). Isprintani modeli izrađeni su većinom od polimera.



Slika 1. 3D printani djelomični model od polimera. Preuzeto s dopuštenjem autora:
doc. dr. sc. Joško Viskić



Slika 2. 3D printani anatomski model. Preuzeto s dopuštenjem autora: doc. dr. sc.
Joško Viskić

3.3 Privremeni nadomjesci

Privremeni nadomjesci bitan su korak u izradi fiksnog nadomjestka jer, osim što održava funkciju, također štiti pulpu i parodont od vanjskih utjecaja. Izrađuju se od polimera, najčešće se radi o biopolimeru PLA te polimetil-metakrilat (PMMA) (slike 3 i 4) (17).



Slika 3. 3D printana privremena krunica od polimera na modelu. Preuzeto s
dopuštanjem autora: doc. dr. sc. Joško Viskiće



Slika 4. 3D printani privremeni nadomjestak od polimera za estetsko, okluzijsko i funkcijsko testiranje. Preuzeto s dopuštenjem autora: doc. dr. sc. Joško ViskiĆ

3.4 Mock up ljuskice

Test ljuskice koje se mogu skidati također se mogu isprintati. Pacijent si tako može lakše predložiti kako će izgledati konačna restauracija. Prvotno se prenese slika stvarne situacije u ustima te se u softveru dizajniraju ljuskice i ta se informacija dalje šalje u pisač koji slojevitim nizanjem polimera izrađuje željeni *mock up*. Polimeri mogu biti u A1, A2 i A3 boji (14).

3.5 Metalne osnove za krunice/mostove

Pomoću tehnike laserskog taljenja modelirati se mogu i metalne osnove za krunice i mostove (slika 5). Mogu se koristiti razni metali, od čega najčešće titanij i kobalt-krom. Iako 3D pisači zahtijevaju prostora i veliku početnu investiciju, prednost te metode naspram konvencionalnog lijevanja metala jest ušteda vremena i veća isplativost ako se koristi za izradu većeg broja nadomjestaka. Tako pomoću pisača u 24 sata može se izraditi 450 krunica, odnosno mostova, dok tehničar konvencionalnom metodom u to vrijeme može napraviti

maksimalno 20 radova (18). Daljnje pitanje koje se nameće jest kakva je veza metala i keramike. U istraživanju koje su proveli Tara i suradnici na 39 pacijenata, sa sve skupa 64 modelirane metal-keramičke krunice u praćenom razdoblju od 47 mjeseci nije bilo lomljenja keramike, čime su zaključili da je metoda laserskog taljenja obećavajuća u izradi metal-keramičkih nadomjestaka (19).



Slika 5. 3D printani unutarnji teleskopi od kobalt-kroma postupkom laserskog taljenja.

Preuzeto s dopuštenjem autora: doc. dr. sc. Joško Viskić

3.6 Konstrukcijski modeli za lijevanje ili metalne baze proteza

Konstrukcijski model za ispis može se izraditi od izgorivog polimera. Pomoću softvera na virtualnom modelu popunjavaju se podminirana mjesta, dodaju kvačice, retencijske

mrežice, male i velike spojke (16). Na tako isprintanom modelu dalje se konvencionalnim putem izrađuje metalni odljev. U softveru se, osim konstrukcijskog modela od polimera, može dizajnirati i naposljetku isprintati baza izravno iz metala ili metalnih legura. Takav način proizvodnje, međutim, zahtijeva korištenje skupe tehnologije kod koje su potrebne određene zdravstvene i sigurnosne mjere te velika količina naknadne obrade (1).

3.7 Akrilatne proteze

Razvoj digitalnih sustava u današnje vrijeme omogućava nam proizvodnju potpunih proteza od mikro hibridnih i nano punjenih smola (20). Početna faza izrade uključuje digitalni otisak koji osim grebena mora prikazati i okolnu pomičnu sluznicu, što može biti izazov (21, 22). U istraživanju Inokoshi i suradnika uspoređivane su gornje i donje potpune proteze izrađene konvencionalnim putem i one izrađene aditivnom proizvodnjom kod deset pacijenata (23). Prema procjeni pacijenata, estetika, konačni oblik proteze, stabilnost i udobnost ocijenjene su jednako kod obje tehnike. S druge strane, prema procjeni protetičara stabilnost i estetika bile su bolje ocijenjene kod konvencionalne tehnike izrade. Vrijeme izrade duže je kod aditivne proizvodnje, a sveukupno zadovoljstvo ocijenjeno je jednakim.

3.8 Udlage

Printati se mogu i udlage kao što su *Michigan* udlage ili udlage za pozicioniranje bravica u ortodonciji, što uvelike skraćuje vrijeme postavljanja bravica. Kod *Michigan* udlaga prvotno se skenira situacija u ustima, zatim se digitalno odredi granice udlage, odredi se os umetanja, popunjava se podminirana mjesta na modelu i zadaje se željena vrijednost retencije. Na digitalnom artikulatoru umeće se antagonistički zagriz. Isprintana udlaga mora se dodatno polimerizirati, ispolirati i očistiti u ultrazvučnoj kupelji (14, 16).

4. OSTALE INDIKACIJE U DENTALNOJ MEDICINI

4.1 Udlage u ortodonciji

Za ispravljanje manjih ortodontskih anomalija mogu se koristiti ortodontske udlage, odnosno *aligneri* za koje je potrebno prvo prenijeti informaciju o pacijentu, bilo da se intraoralnom digitalnom kamerom snime gornji i donji zubni niz, da se konvencionalnim načinom uzme otisak i njega snimi ili da se snimi već izrađeni studijski model. U softveru se predvide koraci pomicanja zubi i isprintaju se modeli na koje se od termoplastičnih folija prešaju *aligneri* za cijeli tijek terapije.

4.2 Individualni upornjaci za implantate

Za izradu individualiziranih upornjaka potrebno je najprije skenirati ili situaciju u ustima ili već izrađeni model koji služi kao temelj za oblikovanje upornjaka. U programu se dizajniraju, a izrađuju se procesom laserskog sinteriranja i/ ili laserskog taljenja. Aditivnom proizvodnjom možemo izraditi upornjak bilo koje veličine i oblika. Podatci koji se koriste za izradu upornjaka za implantate također se mogu koristiti za izradu krune, nakon čega se dodatno pojednostavljuje proizvodni proces za cijeli umjetni zub koji sadrži implantat, implantantni upornjak i krunu (24). Od materijala najčešće se koriste titan i njegove legure koje mogu biti presvučene keramikom i time omogućiti bolju estetiku upornjaka.

4.3 Modeli čeljusti

Pomoću 3D pisača mogu se izraditi anatomske modeli čeljusti koji mogu poslužiti za planiranje operacija kao kod ugradnje implantanata, što olakšava i ubrzava zahvat, a smanjuje mogućnost pogreške. Također, mogu se izraditi i titanski umetci bilo cijele čeljusti ili nekog njezinog dijela (6).

4.4 Kirurške šablone

Uporaba kirurških šablona u implantoprotetskoj terapiji postaje uobičajena (25). Da bi se izradio, potreban je CB/CT (engl. *cone beam computed tomography*)/CT (engl. *computed*

tomography) koji daje informacije o anatomiji te digitalizirani model situacije, gdje se vrši planiranje protetske opskrbe. Na virtualnom modelu određuje se smjer i dužina implantata. Ucertavaju se granice šablona i ugrađuju se vodilice ovisno o odabranom implantatnom sustavu (slike 6 i 7) (16). Kirurške šablone moraju biti robusne i precizne te moraju biti izrađene od materijala koji se može sterilizirati (26).



Slika 6. 3D printana implantatna žlica za otiskivanje. Preuzeto s dopuštenjem autora:
doc. dr. sc. Joško Viskiće



Slika 7. 3D printana implantatna žlica za otiskivanje u ustima pacijenta. Preuzeto s
dopuštanjem autora: doc. dr. sc. Joško Viskić

5. PRECIZNOST

Kada govorimo o preciznosti printanja, između ostalog govorimo i o debljini sloja. Ne zahtijevaju svi uradci visoku preciznost. Tako za izradu individualne žlice koristi se najveća moguća debljina sloja, dok printanje voštanih konstrukcijskih modela za lijevanje zahtijeva najveću preciznost, odnosno najtanji sloj. Osim preciznosti, debljina sloja dirigira i brzinu printanja modela, što je deblji sloj, veća je brzina printanja (6). Preciznost printanih objekata varira ovisno o složenosti geometrije, načinu proizvodnje i materijalima koji se koriste. SLA pisači postižu debljinu sloja od 25 μm , SLS od 60 μm , FDM pisači postižu preciznost od samo 127 μm , a kod TIJ pisača preciznost ovisi o veličini kapljice i ona iznosi od 10 – 150 pikolitara (4). Kada gledamo proces printanja u xyz-osi postiže se velika točnost u z osi od oko 20 μm , iako je važnija xy-točnost, koja bi trebala iznositi 100 μm ili manje da bi bila prihvatljiva u dentalnoj medicini. Što je xy-vrijednost manja, projektor je bliže printanom objektu i time se smanjuje radno područje (14). Objavljeni su brojni članci u kojima se raspravlja o preciznosti isprintanih radova.

U znanstvenom radu Yoo-Geum i suradnika provedeno je istraživanje s ciljem usporedbe preciznosti izrade *computer aided design/computer aided manufacturing* (CAD/CAM) anatomskih modela i 3D modela, koristeći SLA pisače (27). Pomoću softvera uspoređivana su vrijednosti ukupno 20 modela od kojih 10 izrađeno 3D ispisom i 10 glodanih. Zaključno, rezultati su pokazali da je veća preciznost kod anatomskih modela izrađenih 3D pisačem.

S druge strane, u istraživanju Parka i Shina uspoređeni su anatomske modeli izrađeni konvencionalnim putem i oni izrađeni 3D pisačem, PPJ-om i DLP-om. Dokazano je da su volumetrijske promjene najmanje izražene kod modela izrađenih konvencionalnim putem, zatim kod onih izrađenih DLP-om, a najveće kod *polyjet* postupka (28).

Nadalje, u znanstvenom radu autora Amana i suradnika uspoređivani su marginalni i unutarnji dosjed metalnih osnova za krunice izrađene od kobalt-kroma i to trima metodama, u potpunosti konvencionalnim putem, printanjem osnova od smole pomoću SLA pisača u kombinaciji s konvencionalnim lijevanjem metala i printanjem metala metodom izravnog laserskog sinteriranja (29). Iako su marginalne i unutarnje diskrepance u svim trima metodama bile unutar klinički prihvatljivih vrijednosti, najbolji marginalni dosjed pokazao se kod metalnih osnova izrađenih izravnim laserskim sinteriranjem, dok su najbolji unutarnji dosjed imale metalne osnove izrađene u potpunosti konvencionalnim putem.

Kada govorimo o ispisu keramike, u članku Wanga i suradnika uspoređivana je točnost izrade cirkonskih krunica CAD/CAM-om i tehnikom izravnog injekcijskog printanja analizirajući

okluzalnu plohu te vanjsku, unutrašnju i marginalnu površinu krunica, gdje se zaključilo da aditivna metoda izrade keramičkih krunica ne zaostaje za suptraktivnom metodom odnosno CAD/CAM-om (30).

6. RASPRAVA

Ubrzani razvoj tehnologije u medicini uvelike olakšava liječenje kako doktorima tako i pacijentima. Razlog ubrzanog razvoja leži u digitalnoj transformaciji (6). U dentalnoj medicini razvojem digitalizacije najprije su se nametnule suptraktivne metode kojima se objekt dobiva glodanjem iz bloka, čime se ostavlja jako puno neiskorištenog materijala. 2000-ih godina započela je uporaba 3D ispisa kao aditivne metode izrade u dentalnoj medicini. Iako kažemo za 3D ispis da se radi o novoj metodi proizvodnje, ona u suštini nije nova jer postoji već više od 15 godina, ali tek se sada počela intenzivno koristiti u dentalnim laboratorijima jer se njena profitabilnost povećala smanjenjem cijena samih pisača, a za očekivati je da će isplativost 3D ispisa u budućnosti biti još veća (14). Kada uspoređujemo suptraktivne i aditivne metode proizvodnje, 3D pisači za izradu željenog objekta koriste postupak slojevanja, stoga se preostali materijal može ponovno iskoristiti. Osim svoje ekonomičnosti, prednost mu je velika brzina proizvodnje te jednostavna izrada složenih oblika s podminiranim područjima (16). Budući da su se u samim počecima 3D ispisa koristili samo polimeri, o njihovoj mogućnosti, odnosno iskoristivosti najviše se zna. Danas se, osim polimera, mogu modelirati metali, a u novije vrijeme počela se modelirati i keramika. Ispis keramičkih nadomjestaka već sada pokazuje obećavajuće rezultate uz neke izazove s kojima će se u budućnosti morati suočiti, kao što su volumna kontrakcija materijala i izgaranje polimera (6). Ovisno o izboru materijala, mogu se koristiti različiti tipovi 3D pisača koji imaju drugačiji mehanizam slojevanja. Tako stereolitografija i digitalna svjetlosna obrada za printanje koriste tekuću smolu, selektivno lasersko sinteriranje može koristiti razne materijale kao što su fleksibilni elastomeri, najloni s metalnim dodatcima i bez metalnih dodataka, kompoziti, PEEK, metali i metalne legure (titan, kobalt-krom, nehrđajući čelik). Selektivno lasersko taljenje za svoj rad koristi metale, toplinsko injekcijsko printanje biomaterijale, *powder binder* pisači polimer u prahu, fuzijsko depozicijsko sinteriranje samo termoplastične materijale, a *polyjet* postupak radi sa smolama, voskom i silikonima. Svi oni imaju svoje prednosti i nedostatke. Od prednosti valja izdvojiti veliku brzinu izrade i visoku preciznost, dok su najučestaliji nedostaci cijena opreme, nužnost završne obrade te opasnost od inhalacije i alergijskih reakcija na materijale (1). U samim počecima indikacije 3D pisača u dentalnoj medicini bile su uske. Polimeri kao prvi materijali koristili su se ponajviše za izradu radnih modela, a metali za metalne konstrukcije. Danas su se indikacije u dentalnoj medicini značajno proširile, osobito indikacije polimera (16). Premda govorimo o strojnoj izradi objekata, tehničar je taj koji njime upravlja, stoga je iznimno važna njegova stalna izobrazba i usavršavanje kako bi se iskoristile sve mogućnosti te perspektivne metode (6).

7. ZAKLJUČAK

U današnje vrijeme sve se više prelazi na digitalnu, modernu tehnologiju pa tako i u dentalnoj medicini. Stomatolozi i zubni tehničari moraju biti sve više informatički obrazovani. 3D pisači imaju široku primjenu u različitim granama dentalne medicine. Kad govorimo o materijalima, printanje je započeto s polimerima, izrađivali su se jednostavniji objekti, a danas se mogu izraditi objekti složene morfologije. Osim polimera, koriste se metali i keramika. Ta aditivna metoda, osim što je ugodnija za pacijenta jer je manje invazivna i smanjuje vrijeme provedeno u ordinaciji, ona je, dugoročno gledano, ekonomski isplativija jer smanjuje troškove izrade i povećava brzinu proizvodnje. Razvojem tehnologija u 3D ispisu može se očekivati da će se u budućnosti smanjiti završna obrada modela oblikovanih 3D tehnologijom, riješiti problem volumne kontrakcije kod ispisa keramike ili da će se printani zubni nadomjesci moći digitalno bojati.

3D pisači u medicini su u upotrebi gotovo 20 godina i iako su napredovali, još ima prostora za njihov razvitak i poboljšanje.

8. LITERATURA

1. Dawood A, Marti Marti B, Sauret-Jackson V, Darwood A. 3D printing in dentistry. *BDJ Open*. 2015;219(11):521-9.
2. Khaing MW, Fuh JY, Lu L. Direct metal laser sintering for rapid tooling: processing and characterization of EOS parts. *J Mat Proc Tech*. 2001; 113(1-3):269-72.
3. Guk Bae K, Sangwook L, Haekang K, Dong HY, Young-Hak K, Yoon Soo K et al. Three-Dimensional Printing: Basic Principles and Applications in Medicine and Radiology. *Korean J Radiol*. 2016;7(2):182-97.
4. Barazanchi A, Li KC, Al-Amleh B, Lyons K, Waddell JN. Additive technology: update on current materials and applications in dentistry. *J Prosthodont*. 2017;26(2):156-63.
5. Yue J, Zhao P, Gerasimov JY, van de Lagemaat M, Grotenhuis A, Rustema-Abbing M, et al. 3D-Printable Antimicrobial Composite Resins. *Adv Funct Mater*. 2015;25(43):6756–67.
6. See C. 3D ispis i klinička upotreba. Što znamo? *Quintessenz Zahntechnik*. 2018; 44(2):165-8.
7. Silva NRFA, Witek L, Coelho PG, Thompson VP, Rekow ED, Smay J. Additive CAD/CAM process for dental prostheses. *J Prosthodont*. 2011;20(2):93-6.
8. Ebert J, Özkol E, Zeichner A, Uibel K, Weiss Ö, Koops U, et al. Direct inkjet printing of dental prostheses made of zirconia. *J Dent Res*. 2009;88(7):673-6.
9. Chen Z, Ikeda K, Murakami T, Takeda T. Drainage phenomenon of pastes during extrusion. *J Mater Sci*. 2000;35(10):2517-23.
10. Davies J, Binner JG. Coagulation of electrosterically dispersed concentrated alumina suspensions for paste production. *J Eur Ceram Soc*. 2000;20(10):1555-67.
11. Li X, Shaw LL. Microstructure of dental porcelains in a laser-assisted rapid prototyping process. *Dent Mater*. 2005;21(4):336-46.
12. Li X, Wang J, Shaw LL. Optimization of the cross section geometry of laser-densified dental porcelain bodies for rapid prototyping processes. *Rapid Prototyping J*. 2005;11(3):140-52.
13. Osman RB, Van der Veen, AJ, Huiberts D, Wismeijer D, Alharbi N. 3D-printing zirconia implants: a dream or a reality? An in-vitro study evaluating the dimensional accuracy, surface topography and mechanical properties of printed zirconia implant and discs. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2017;75(11):521–8.
14. Kaufmann-Jinoian V. Odluka o kupnji, mogućnosti, potencijali: 3D printanje u laboratorijskoj svakodnevici. Od uvođenja preko vlastite izrade pa sve do svakodnevne uporabe. *Quintessenz Zahntechnik*. 2018;44(2):220-35.

15. Birnbaum N S, Aaronson H B. Dental impressions using 3D digital scanners: virtual becomes reality. *Compend Contin Educ Dent*. 2008;29(8):494–505.
16. Binder R. 3D tisak s materijalima na bazi polimera: Primjena tehnologije cara Print 4.0 DLP. *Quintessenz Zahntechnik*. 2018;44(2):236-45.
17. Molinero-Mourelle P, Canals S, Gómez-Polo M, Solá-Ruiz MF, Del Río Highsmith J, Viñuela AC. Polylactic Acid as a Material for Three-Dimensional Printing of Provisional Restorations. *Int J Prosthodont*. 2018;31(4):349-50.
18. Venkatesh KV, Nandini VV. Direct metal laser sintering: a digitized metal casting technology. *J Indian Prosthodont Soc*. 2013;13(4):389-92.
19. Abou Tara M, Eshbach S, Bohlsen F, Kern M. Clinical outcome of metal-ceramic crowns fabricated with laser-sintering technology. *Int J Prosthodont*. 2011;24(1):46-48.
20. Revilla-León M, Özcan M. Additive Manufacturing Technologies Used for Processing Polymers: Current Status and Potential Application in Prosthetic Dentistry. *J Prosthodont*. 2018;[Epub ahead of print] doi: 10.1111/jopr.12801.
21. Maeda Y, Minoura M, Tsutsumi S, Okada M, Nokubi T. A CAD/CAM system for removable denture. Part I: Fabrication of complete dentures. *Int J Prosthodont*. 1994;7(1):17-21.
22. Matsuda T, Goto T, Yagi K, Kashiwabara T, Ichikawa T. Part-digitizing system of impression and interocclusal record for complete denture fabrication. *J Prosthodont*. 2016; 25(6):503-9.
23. Nokoshi M, Kanazawa M, Minakuchi S. Evaluation of a complete denture trial method applying rapid prototyping. *Dent Mater J*. 2012;31(1):40-6.
24. Uckelmann I, Laschütza H. Method for manufacturing implant abutments for dental implants, and an implant abutment for a dental implant. *Bego Medical AG*. 2003;103(5):5-23.
25. Fortin T, Champleboux G, Lormee J, Coudert J. Precise dental implant placement using surgical guides in conjunction with medical imaging techniques. *J Oral Implantol*. 2000;26(4):300–3.
26. Ersoy A E, Turkyılmaz I, Ozan O, McGlumphy EA. Reliability of implant placement with stereolithographic surgical guides generated from computed tomography: clinical data from 94 implants. *J Periodontol* 2008;79(8):1339-45.

27. Jeong YG, Lee WS, Lee KB. Accuracy evaluation of dental models manufactured by CAD/CAM milling method and 3D printing method. *J Adv Prosthodont.* 2018;10(3):245-51.
28. Park ME, Shin SY. Three-dimensional comparative study on the accuracy and reproducibility of dental casts fabricated by 3D printers. *J Prosthet Dent.* 2018;119(5):861.e1-861.e7.
29. Arora A, Yadav A, Upadhyaya V, Jain P, Verma M. Comparison of marginal and internal adaptation of copings fabricated from three different fabrication techniques: An in vitro study. *J Indian Prosthodont Soc.* 2018;18(2):102-7.
30. Wang W, Yu H, Liu Y, Jiang X, Gao B. Trueness analysis of zirconia crowns fabricated with 3-dimensional printing. *J Prosthet Dent.* 2018;[Epub ahead of print] doi: 10.1016/j.prosdent.2018.04.012.

9. ŽIVOTOPIS

Andrea Juran rođena je u Šibeniku 16. listopada 1993. Osnovnu školu pohađala je u Murteru. Opću gimnaziju u Zadru upisala je 2008. godine. Maturirala je 2012. i iste godine upisala Stomatološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Za vrijeme studija radila je kao asistent u specijalističkoj stomatološkoj ordinaciji za parodontologiju te aktivno sudjelovala u studentskim kongresima. Tijekom 2017. i 2018. godine kao studentica volonterka radila je na Projektu za promociju oralnog zdravlja slijepih i slabovidnih osoba. Odradila je staž u domu zdravlja Zagreb – Istok. Apsolvirala u lipnju 2018.